第46卷　第5期
2023年5月

干旱区地理
ARID　LAND　GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 5
May　2023

粮食单产视角下中国北方农牧交错带粮食安全研究

孔德明[1,2]，　郝丽莎[1,2]，　夏四友[3,4]，　李红波[1,2]

（1. 南京师范大学地理科学学院，江苏　南京　210023；2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心，江苏　南京　210023；3. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京　100101；4. 中国科学院大学资源与环境学院，北京　100049）

摘　要：从中国北方农牧交错带粮食安全和粮食单产的重要性出发，利用空间自相关分析揭示带内粮食单产的空间分异及演化特征，作为划分农牧业发展地域的依据，进而利用地理探测器模型揭示控制单产分异的主导因子及其交互作用，藉此探讨提高带内粮食单产、保障粮食安全的对策。结果表明：（1）2000—2020年带内粮食单产呈现相对稳定的集聚分布态势，自然环境分异大势是其基础性控制因素，社会生产条件及其耦合水平则强化了粮食单产的空间分异特征。（2）单产热点区主要集中在带内东北部平原地区和西南部河湟谷地，冷点区分布在中部水土流失区和丘陵地区，次热和次冷点区则围绕热、冷点形成圈层结构；依据该格局可将热点区划分为宜农区，将次热和次冷区划分为农牧耦合区，将冷点区划分为生态修复区，以因地制宜地促进带内农牧业协调发展。（3）2000—2020年带内粮食单产的增长模式从以劳动力为主导转变为以现代农业技术为主导，但出现了劳动力与耕地、现代农业技术之间过度解耦，以及各种现代农业技术之间的耦合性不足等问题，因而提出了以“人-地-技”耦合发展促进粮食单产健康增长、提高粮食安全保障能力的建议。

关 键 词：粮食安全；粮食单产空间分异；影响因素；地理探测器；中国北方农牧交错带

文章编号：1000－6060(2023)05－0782－11(0782～0792)

粮食安全是世界经济发展的“三大安全”问题之一[1]。近年来，国际冲突、极端天气、全球性公共卫生问题等使国际粮食安全面临严峻挑战[2-4]。中国作为粮食产消大国，粮食安全关乎国内经济和社会的稳定发展，是国家安全的重要保障[5]。党的十八大以来，党中央提出了“确保谷物基本自给、口粮绝对安全”的新粮食安全观，并在2022年中央一号文件中提出要“不断提高主产区粮食综合生产能力，切实稳定和提高主销区粮食自给率，确保产销平衡区粮食基本自给”。同时，随着中国社会经济发展和居民食物结构的转变，2019年《中国的粮食安全》白皮书提出应“顺应饲料用粮需求快速增长趋势，满足居民对肉蛋奶等的营养需求”，使中国乳畜产品和饲料粮安全的重要性也日益凸显，粮食安全逐渐拓展为农牧协调的“大粮食安全观”[6]。

中国北方农牧交错带是半湿润区与半干旱区的过渡带，也是中国农区和牧区过渡发展的重要农业地带。一方面，带内有中国北方重要的粮食主产区，且其余地区均为产销平衡区，因而确保带内粮食稳产、增产意义重大；另一方面，带内天然草场和牧草种植带规模大，是中国生态草牧业发展核心区，而带内粮食生产也是带内饲料粮供给的重要来源[7]。由此可见，北方农牧交错带是中国落实粮食安全战略和“大粮食安全观”的关键地带。

然而，带内长期存在农牧生产镶嵌分布，土地利用和农业生产波动大等问题[6,8]，因而科学划分带

收稿日期：2022-08-09；　**修订日期：**2022-11-10
基金项目：教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJCZH069)资助
作者简介：孔德明(1998-)，女，硕士研究生，主要从事经济地理与区域可持续发展研究. E-mail: 467143819@qq.com
通讯作者：郝丽莎(1981-)，女，副教授，主要从事经济地理与区域可持续发展研究. E-mail: lisahull@163.com

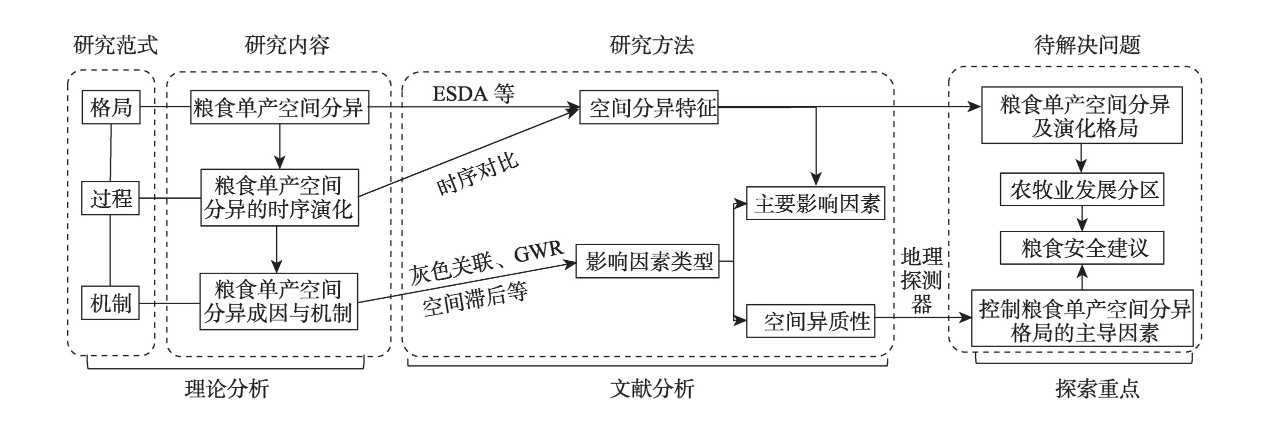
内农牧业发展地域是促进农牧业协调发展、保障大粮食安全的重要基础。但现有关于北方农牧交错带农牧格局的研究多是从土地利用结构或生产结构的角度，将其划分为偏农、偏牧、偏林、农牧和牧农等类型[9-10]，无法反映土地生产潜力的实际水平和未来发展趋势。因此，需要为带内农牧业发展区划寻求更科学的依据。

此外，带内生态系统还具有脆弱性和敏感性特征[8]，长期以来不合理的农业发展结构和水资源过度开发利用，导致带内部分地区土地质量下降，而本带作为中国中东部地区重要的生态安全屏障和京津冀地区水源涵养带，还需科学划定退耕还草、限耕限牧的生态恢复区[11]。因此，带内不能继续走依靠增加耕地面积来提高粮食产量的老路[12]，而应当从"藏粮于技"战略出发，积极利用现代农业技术改变带内粮食单产偏低而不稳[11,13]的现状，充分发挥现有耕地的生产潜力[14-16]，保障带内粮食安全。

从本质上而言，粮食单产是耕地在自然和社会生产条件综合影响下所表现出的粮食生产潜力，是其宜农性的直观反映。因此，如果北方农牧交错带的粮食单产具有显著的空间集聚性和相对稳定性，即可将粮食单产分异格局作为带内农牧业发展区划的重要依据。进而，通过分析控制粮食单产空间分异格局的主要因素及其演化，一方面能够更深入地理解分异格局形成与保持相对稳定的原因，预判其未来发展趋势，为划分农牧业发展地域提供更科学的依据；另一方面，有利于发现带内粮食生产发展的优势及问题，为进一步提高粮食单产、保障粮食安全提供依据。

目前，学者们普遍利用空间自相关、热点分析等方法考察粮食单产分异特征[17-18]，能够有效揭示区域内粮食单产的空间分异及演化特征。在此基础上，灰色关联分析[19]、空间滞后模型[20]、地理加权回归(GWR)模型[18,21]等方法常被用于探索影响粮食单产分异的主要因素及其作用水平。相关研究已论证了粮食单产的主要影响因素包括气候、坡度、土壤类型、土壤有机质、地下水埋深等自然因素[18,22]，以及种粮人口规模、有效灌溉面积、农用化肥折纯量、农业机械总动力等社会生产因素[17,21]。但是，上述分析结果仅能反映出各因素的变化分别能导致区域粮食单产发生多大变化[19-20]，或是揭示出相关因素对区域粮食单产的影响作用存在一定的空间异质性[17-18](图1)，但未能解决控制区域粮食单产空间分异格局及其相对稳定性的主导因素是什么的问题，特别是无法揭示因素间的交互作用及其对粮食单产分异格局的影响。而地理探测器模型则着眼于被解释变量和解释变量空间分异格局之间的统计关联性，来探测被解释变量空间分异的主要驱动因子，并能够探测驱动因子间的交互作用，因而更有利于解释区域粮食单产的空间分异机制[23-24]。

综上所述，本文拟在考察2000—2020年北方农牧交错带内县域单元的粮食单产空间分异及其演变特征的基础上，采用地理探测器模型分析粮食单产时空分异的主要影响因素及其交互作用机制，藉此合理划分带内农牧业发展区域，并从调控粮食单



注：ESDA为探索性空间数据分析；GWR为地理加权回归。

图1　研究思路分析

Fig. 1　Analysis of research ideas

产主要制约因子的角度，为提高带内粮食单产、保障粮食安全提供建议。

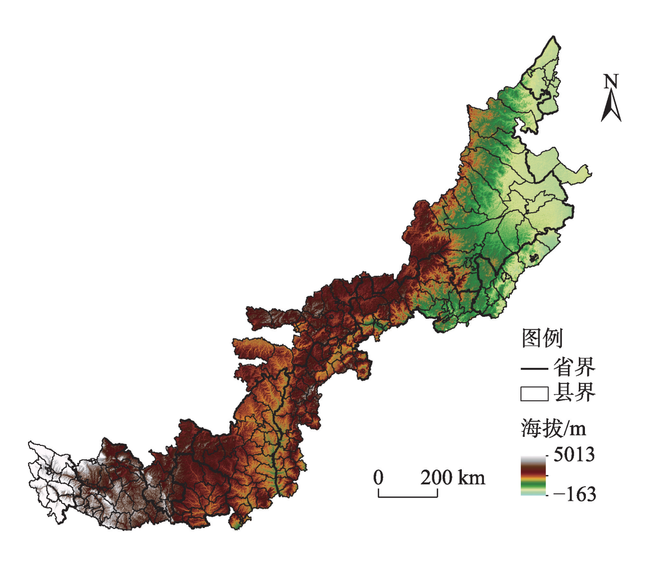
1 研究区概况

目前学界对于北方农牧交错带地域范围的界定尚不统一[25-26]。本文以县域粮食单产为着眼点，兼顾县域区划的完整性，借鉴任强等[26]的研究成果，将中国北方农牧交错带的范围界定在100°~125°E和34°~49°N之间，下辖231个县（旗、县级市及市辖区），总面积约73×10^4 km^2（图2）。带内东部由内蒙古高原向华北、东北平原过渡，中部大部分为黄土高原区，西部由黄土高原向青藏高原过渡；海拔由东北向西南递增，最低处不及200 m，最高处超过4500 m；年平均气温2~8 ℃，年平均降水量250~500 mm。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文用粮食总产量与粮食播种面积的比值表征粮食单产，粮食总产量、粮食播种面积以及社会生产指标来自2001—2021年《中国县域统计年鉴》及各省统计年鉴。海拔和坡度数据来自30 m×30 m的数字高程模型（DEM）数据，并采用ArcGIS 10.2进行栅格统计处理和坡度分析。土壤肥力基础数据来自中国土壤数据库，采用土壤综合肥力指数[27]表示。由于研究期内涉及行政区划调整，因而以2019年行政区划为基准，将各年份的县域单元均处理为231个有效县域单元。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图2 北方农牧交错带示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the argo-pastoral ecotone of northern China

2.2 研究方法

2.2.1 空间自相关分析 本文利用全局莫兰指数（Global Moran's I）反映粮食单产高值和低值的全局空间集聚特征，利用热点分析（Getis-Ord G_i^*）考察粮食单产在局部空间位置上的集聚程度，划分"高高集聚"的热点区和"低低集聚"的冷点区。Global Moran's I 和Getis-Ord G_i^*的表达式见参考文献[28]。具体计算依托ArcGIS 10.2软件完成。

2.2.2 地理探测器分析 地理探测器是探测地理事物空间分异性的驱动因子的一种统计学方法，基本思想是：假设研究区分为若干子区域，如果子区域的方差之和小于区域总方差，则存在空间异质性；若两变量的空间分布趋于一致，则两者存在统计关联性[29]。地理探测器模型由风险探测、因子探测、生态探测和交互探测4个模块组成。

其中，因子探测通过比较某一因子与地理事物的变化在空间上是否具有显著的一致性，进而判断该因子对地理事物的空间变化是否具有决定作用，同时用q值探测该因子在多大程度上解释了地理事物的空间异质性[30]。计算公式如下[29]：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 \quad (1)$$

式中：q为影响因子X对地理事物Y空间分异格局的解释力，值域为[0, 1]，q值越大，表明X对Y空间分异的影响力越大，反之则越小；h为影响因子X的分类数，h=1，2，…，L；N_h和N分别为类型h和全区的单元数；σ_h^2和σ^2分别为类型h和全区的Y值方差。

交互探测可以探测双因子间的交互影响力，识别其对地理事物的共同作用，由以下表达式构成：若$q(x_1 \cap x_2) < \min[q(x_1), q(x_2)]$，说明因子$x_1$与$x_2$交互后非线性减弱；若$\min[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < \max[q(x_1), q(x_2)]$，说明因子$x_1$与$x_2$交互后单线性减弱；若$q(x_1 \cap x_2) > \max[q(x_1), q(x_2)]$，说明因子$x_1$与$x_2$交互后双线性加强；若$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$，说明因子$x_1$与$x_2$交互后非线性加强；若$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$，说明因子$x_1$与$x_2$相互独立。具体计算依托地理探测器2015完成。

3 结果与分析

3.1 粮食单产的时空分异特征

2000—2020年北方农牧交错带粮食单产Global Moran's *I*全部为正，均通过5%的显著性检验，即粮食单产高(低)的县域在空间上均呈现集聚分布态势。并且，Global Moran's *I*基本在0.40左右波动(图3)，表明北方农牧交错带粮食单产的空间分异特征具有一定的稳定性。

从局部空间自相关来看(图4)，2000—2020年北方农牧交错带粮食单产的分异格局呈现出以分散的冷、热点区为核心的圈层嵌套结构。其中，热点区分散在东北部、南部和西南部，总体上热点覆盖范围小但有所扩大，其中东北部热点区扩大连片后又退化破碎；冷点区主要分布在中部，覆盖范围有所缩小且呈相对集中趋势；次冷点范围显著缩小，仅存于冷点区域外围，而次热点范围则相应扩大连片。由此可见，带内粮食单产总体水平有所改

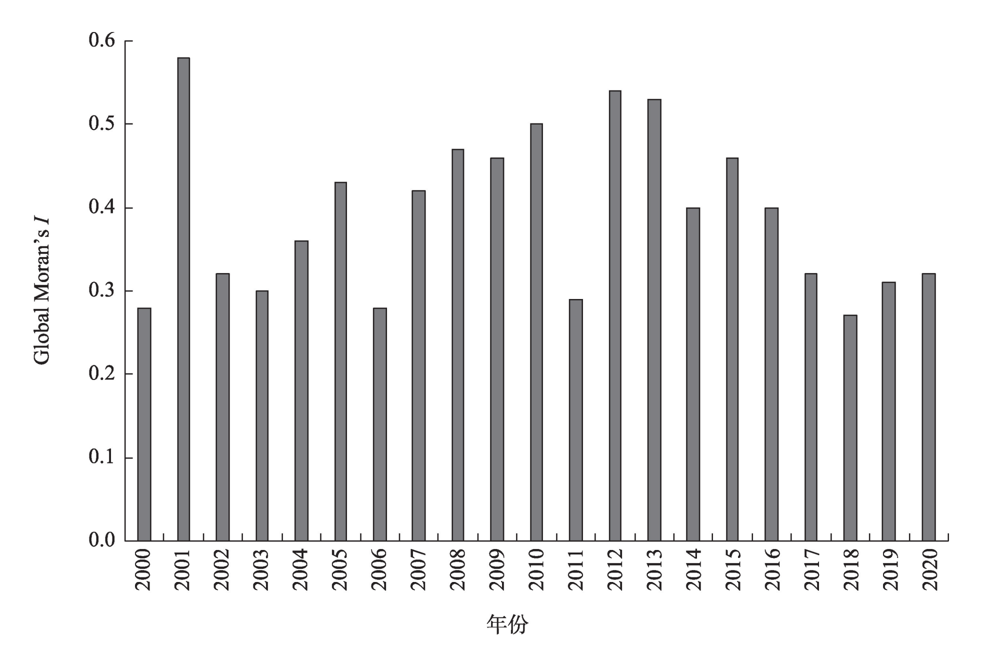


图3 2000—2020年中国北方农牧交错带粮食单产的全局莫兰指数(Global Moran's *I*)时序演变

Fig. 3 Temporal evolution of Global Moran's *I* of grain yield in the argo-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

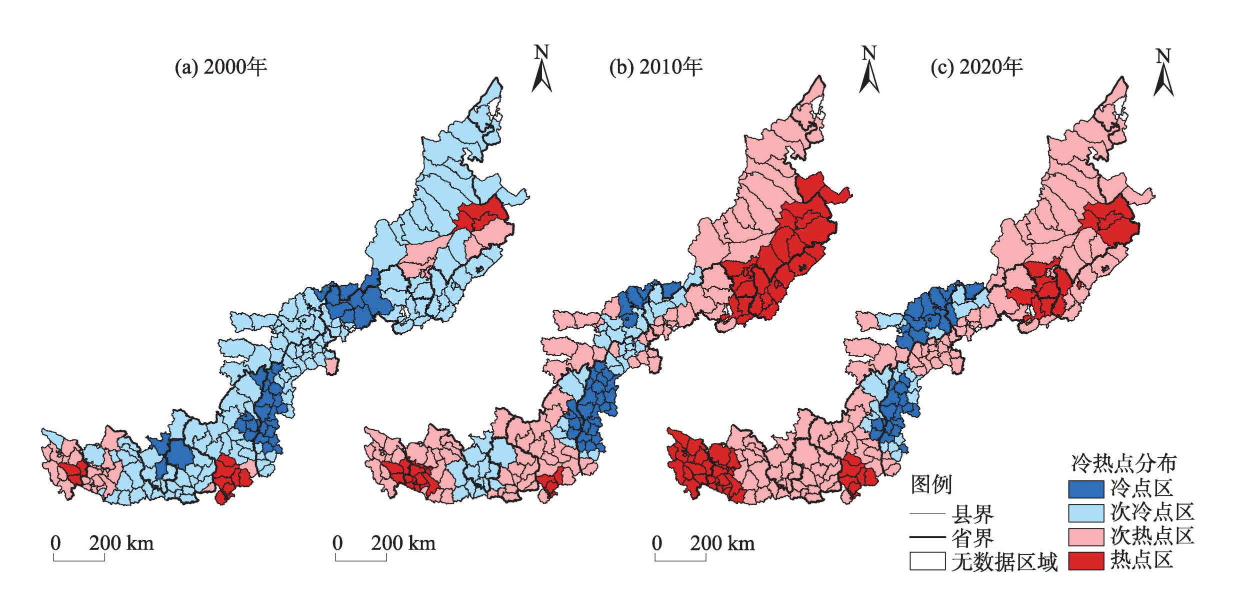


图4 2000—2020年中国北方农牧交错带粮食单产冷热点区域演化

Fig. 4 Evolution of cold and hot areas of grain yield in the argo-pastoral ecotone of northern China from 2000 to 2020

善,但空间分异依然显著,高产县和低产县数量均较少,且分布较分散,呈区位"锁定"格局。

3.2 粮食单产时空分异影响因素分析

借鉴已有研究成果[17-22],分别从社会生产条件和自然条件2个方面选取12个影响指标(表1),利用地理探测器量化其对带内粮食单产时空分异的影响作用(表2、表3)。

2000年,影响带内粮食单产空间分异的主导因素为种粮人口规模,解释力为0.255,且任意因子与种粮人口规模交互后解释力均明显增强。由此表明,种粮人口多的县域在粮食生产上投入的劳动力更多,有利于精耕细作,发挥耕地潜力,提高粮食单产;反之,随着工业化和城市化的进程,部分县域种粮人口的锐减会导致部分耕地撂荒,土地生产效率下降,进而导致其粮食单产下降,加剧粮食单产在带内的分异。

在其他社会生产条件中,有效灌溉面积和化肥施用量的解释力相对较高,表明水、肥是否充足是影响带内粮食单产及其空间分异的重要因素。并且,种粮人口规模与其他社会生产条件的交互解释力均高于0.500,其中与化肥施用量的交互解释力高达0.760,反映出此阶段"人-地-技"之间的耦合性较高,即相对充足的劳动力投入可以充分利用现代农业技术进行粮食生产,在一定程度上避免耕地撂荒;同时,一定规模的粮食播种面积也可以为水、肥利用效率和大型农业机械的规模化使用提供基础条件。相应地,"人-地-技"耦合水平的空间分异对该阶段带内粮食单产的空间分异具有重要影响。

在自然条件中,年降水量、坡度和年日照时数对粮食单产空间分异的解释力较大,并且各类自然因子与"人-地-技"因子的交互解释力亦有所提升,反映出自然条件、特别是水热和地形条件的宏观分异对"人-地-技"因子的利用效率及其耦合效应具有重要影响,是控制带内粮食单产空间分异的基础性因子。

2020年,影响带内粮食单产时空分异的主导因素转变为化肥施用量,解释力上升至0.245,且任意因子与化肥施用量交互后解释力均有所增强。由此表明,在北方农牧交错带土壤肥力普遍偏低的情况下,化肥已成为提高土地肥力、促进粮食增产的主要手段,化肥使用水平的差异对粮食单产空间分异具有较大影响。

在其他社会生产条件中,农业机械总动力、农村用电量和有效灌溉面积的解释力均有明显上升,而种粮人口规模和粮食播种面积的解释力则有所下降,特别是种粮人口规模与其他社会生产因子之间的交互解释力显著下降,表明农业机械化对劳动力产生了明显的替代作用,"人-地-技"之间呈现解耦趋势,现代农业技术成为影响带内粮食单产分异的重要因素。然而,现代农业技术因子间的交互作用对粮食单产分异的解释力增幅较小,特别是化肥施用量与其他现代农业技术因子间的交互解释力亦未有显著增强,表明现代农业技术因子间的协同作用尚未充分发挥,易使现代农业技术的边际收益

表1 中国北方农牧交错带粮食单产影响因素指标体系

Tab. 1 Indicator system of influencing factors of grain yield in the argo-pastoral ecotone of northern China

方面	指标	符号	指标内涵
社会生产条件	种粮人口规模/10^4人	X_1	从事粮食生产活动的劳动力保障,粮食生产活动得以进行的基本要素
	粮食播种面积/hm^2	X_2	反映了实际用于粮食生产的耕地面积,是粮食生产的基础载体,并且与农业现代化、规模化经营相关,能够影响农机、化肥、农药等的使用效率和规模经济效益
	有效灌溉面积/hm^2	X_3	旱作农业生产条件的重要因素之一
	农业机械总动力/10^4 kW	X_4	现代农业生产中影响粮食单产最重要的生产条件之一
	化肥施用量/t	X_5	现代农业生产中影响粮食单产最重要的生产条件之一
	农村用电量/10^4 kW·h	X_6	现代农业生产中影响粮食单产最重要的生产条件之一
自然条件	坡度/(°)	X_7	控制北方农牧交错带耕地分异大势的主要地形条件
	海拔/m	X_8	控制北方农牧交错带耕地分异大势的主要地形条件
	土壤肥力	X_9	耕地质量的主要指标,采用土壤肥力综合指数表示[27]
	年平均气温/℃	X_{10}	控制北方农牧交错带耕地分异大势的主要气候条件,主要影响粮食生产的水热条件
	年日照时数/h	X_{11}	控制北方农牧交错带耕地分异大势的主要气候条件,主要影响粮食生产的水热条件
	年降水量/mm	X_{12}	控制北方农牧交错带耕地分异大势的主要气候条件,主要影响粮食生产的水热条件

表2　中国北方农牧交错带粮食单产影响因素解释力探测

Tab. 2　Explanatory power detection of influencing factors of grain yield in the argo-pastoral ecotone of northern China

指标	2000年		2020年	
	q	P	q	P
X_1	0.255**	0.040	0.130**	0.035
X_2	0.109**	0.020	0.090**	0.042
X_3	0.157***	0.010	0.173***	0.002
X_4	0.110**	0.026	0.210***	0.005
X_5	0.151**	0.046	0.245**	0.033
X_6	0.109**	0.027	0.206***	0.004
X_7	0.120**	0.012	0.101**	0.044
X_8	0.096**	0.022	0.226***	0.000
X_9	0.085**	0.035	0.088**	0.039
X_{10}	0.081**	0.047	0.191***	0.003
X_{11}	0.114***	0.003	0.178***	0.007
X_{12}	0.144***	0.004	0.244***	0.000

注：q为影响因子解释力；P为置信水平；***、**、*分别表示在1%、5%、10%水平上显著。

降低，且粮食生产对化肥具有较高依赖性，存在土壤退化风险。

在自然条件中，除了坡度的解释力有所下降、土壤肥力的解释力基本不变外，其他因子的解释力均有明显提升，表明对丘陵地区的土地改造和“高质量农田”建设在一定程度上降低了坡度和土壤肥力对粮食单产的制约作用，使水热条件对粮食生产的基础性制约作用凸显出来。并且，各自然因子与化肥施用量的交互解释力均在0.500以上，特别是年降水量与化肥施用量的交互解释力达0.684，表明化肥施用对于带内水热和肥力条件较好的粮食主产区具有更显著的增产作用，即社会生产条件与自然条件的交互作用强化了粮食单产的空间分异。

4　讨　论

4.1　带内粮食单产空间分异显著且相对稳定

2000—2020年带内粮食单产具有显著的空间集聚特征，粮食单产热点区主要位于内蒙古自治区东北部，青海省、甘肃省交界的河湟谷地和陕西省中部地区，主要为平原地区或河谷地带，地形较平坦、土壤深厚肥沃，农业机械化水平较高，粮食生产的条件好、潜力大。冷点区分布在内蒙古自治区中部的商都县、太仆寺旗和山西省娄烦县、古交县等地，多位于长城沿线沙化退化地区和黄土丘陵沟壑区，土地退化和水土流失严重，耕地质量差，农业现代化生产水平不高，粮食单产较低，撂荒和退耕还草情况较多。此外，自然条件相对较好的甘肃省环县、宁夏回族自治区同心县等地，近年来利用现代农业技术、特别是节水灌溉技术，稳步提高了粮食单产，逐渐发展成为次热点区。以上结果与陶泽涪等[8]对北方农牧交错带耕地时空演化的研究基本相符，亦与陈海等[9]划分的带内农林牧业生产结构类型以及闫旭东等[31]划分的内蒙古自治区粮食生产布局分区具有一定的空间对应性。总体上，北方农牧交错带内的粮食单产空间分异显著且相对稳定，具有典型的空间依赖性，因而可以认为粮食单产空间分异特征能够综合反映北方农牧交错带内耕地的生产潜力格局，并以此作为带内农牧业发展区划的重要依据。

4.2　带内粮食单产分异是自然与社会条件交互作用的结果

本研究运用地理探测器模型分析2000—2020年北方农牧交错带粮食单产空间分异的影响因素，不仅得出了与已有研究[19,32]相似的结果，如现代农业技术应用已替代劳动力成为影响带内粮食单产的主导因素，水热条件匹配程度越高越有利于粮食单产提高；也发现了与已有研究[18,31]有差异的新趋势，如坡度、土壤肥力、播种面积等因子对带内粮食单产的制约已有所下降。更为重要的是，已有研究仅能揭示出上述因子自身的变化对粮食单产变化的影响水平，或其影响水平的空间异质性，而本研究则通过因子间交互作用分析，揭示出自然环境宏观分异大势是控制北方农牧交错带粮食单产空间分异的基础性因素，社会生产条件及其耦合水平则强化了粮食单产的空间分异特征，从机制上为基于粮食单产分异格局来划分带内农牧业发展地域提供了科学依据。此外，本研究还发现带内存在着劳动力与耕地、现代农业技术之间过度解耦，以及各种现代农业技术之间耦合性偏弱等问题。

4.3　基于粮食单产的带内粮食安全保障建议

（1）因地制宜促进农牧业协调发展

依据北方农牧交错带的粮食单产空间分异格局，可将带内划分为西南部和东北部的宜农区、北部和南部的农牧耦合区以及中部的生态修复区（表

表3 各要素交互作用对粮食单产的解释力

Tab. 3 Explanatory power of interaction of various factors on grain yield

年份	指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
2000	X_1	–											
	X_2	0.534NE	–										
	X_3	0.654NE	0.429NE	–									
	X_4	0.636NE	0.396NE	0.336NE	–								
	X_5	0.760NE	0.545NE	0.540NE	0.525NE	–							
	X_6	0.616NE	0.397NE	0.346NE	0.126BE	0.518NE	–						
	X_7	0.649NE	0.396NE	0.353NE	0.315NE	0.524NE	0.315NE	–					
	X_8	0.665NE	0.377NE	0.408NE	0.293NE	0.502NE	0.297NE	0.439NE	–				
	X_9	0.641NE	0.331NE	0.336NE	0.338NE	0.518NE	0.333NE	0.410NE	0.295NE	–			
	X_{10}	0.625NE	0.326NE	0.333NE	0.340NE	0.506NE	0.334NE	0.396NE	0.287NE	0.106BE	–		
	X_{11}	0.560NE	0.340NE	0.401NE	0.367NE	0.633NE	0.368NE	0.477NE	0.395NE	0.514NE	0.516NE	–	
	X_{12}	0.566NE	0.372NE	0.431NE	0.360NE	0.639NE	0.362NE	0.468NE	0.403NE	0.353NE	0.350NE	0.372NE	–
年份		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
2020	X_1	–											
	X_2	0.377NE	–										
	X_3	0.392NE	0.469NE	–									
	X_4	0.479NE	0.448NE	0.396NE	–								
	X_5	0.554NE	0.602NE	0.474NE	0.413BE	–							
	X_6	0.475NE	0.444NE	0.389NE	0.215BE	0.407BE	–						
	X_7	0.530NE	0.457NE	0.412NE	0.423NE	0.569NE	0.421NE	–					
	X_8	0.531NE	0.431NE	0.502NE	0.517NE	0.634NE	0.514NE	0.424NE	–				
	X_9	0.396NE	0.114BE	0.468NE	0.476NE	0.608NE	0.474NE	0.469NE	0.432NE	–			
	X_{10}	0.648NE	0.477NE	0.645NE	0.588NE	0.672NE	0.594NE	0.665NE	0.581NE	0.489NE	–		
	X_{11}	0.641NE	0.453NE	0.649NE	0.580NE	0.668NE	0.586NE	0.664NE	0.578NE	0.441NE	0.203BE	–	
	X_{12}	0.631NE	0.548NE	0.611NE	0.635NE	0.684NE	0.645NE	0.725NE	0.635NE	0.560NE	0.816NE	0.815NE	–

注:NE表示非线性增强;BE表示双线性增强。

4)。在宜农区,特别是自然条件相对优越、粮食单产高的东部科尔沁地区和西南部民和县等县域,应进一步开展土地整治和高标准农田建设,强化耕地的保水保肥性,以提升现代农业技术利用效率,促进粮食单产可持续增长,巩固和提升其作为粮食主产区的口粮供给能力。北部和南部的农牧耦合区则应当合理开展种养结合,并在农区依据作物需水和地力情况,调整种植结构[33]、选用抗旱耐旱品种[34],在稳定主粮单产的同时,提升特色杂粮和饲料粮的单产及品质,以农促牧、以牧养农。而对于中部的岚县、绥德县等生态脆弱、粮食单产低的县域,则应该优先保障其生态屏障功能,推进退耕还草和保护性耕作,降低水土流失和土地沙化风险。同时,应通过建立健全县级储备粮体系,确定退耕农户的粮食补助标准,以及保障带内外粮食市场流通等方式,实现带内各地区口粮数量和结构的供需平衡,以确保分区发展的可持续性(图5)。

(2) 以"人-地-技"耦合发展促进粮食单产持续增长

"人-地-技"耦合发展的内涵为稳定劳动力规模、提升劳动力生产技能,促进土地规模化、集约化利用,以提升现代农业技术的利用效率(图5)。首先,应对大量农村劳动力外流导致耕地撂荒的现状,应当建立健全粮食生产补贴体系,稳定和提高农民的种粮收入,以稳定劳动力规模及耕地利用率。其次,应加快发展联农带农性强的农民合作社和农业龙头企业等,进一步提升耕地规模化、集约化经营水平,提高农业机械服务的组织化程度,并着力提升劳动力的农业技术和农业机械使用水平,以切实提高农业机械在播种、耕田、施肥、灌溉、收割等多环节

表4　中国北方农牧交错带生产功能分区

Tab. 4　Production function zoning of the argo-pastoral ecotone of northern China

类型	省(区)	县域
宜农区(热点区)	内蒙古自治区	科尔沁左翼中旗、开鲁县、松山区、科尔沁区、科尔沁左翼后旗、宁城县、喀喇沁旗
	辽宁省	建平县、凌源市、龙城区
	河北省	平泉市、承德县、隆化县
	陕西省	甘泉县、富县、黄陵县、洛川县、黄龙县、宜君县、印台区、王益区
	甘肃省	永登县、红古区、皋兰县、西固区、城关区、七里河区、永靖县、积石山县、临夏县、临夏市、临洮县、东乡族自治县、和政县、广河县、康乐县、渭源县
	青海省	民和县、循化县、同仁县、乐都区、互助县、大通县、湟中区、城西区、城北区、城中区、城东区、平安区、化隆县、尖扎县、贵德县
农牧耦合区(次热、次冷点区)	黑龙江省	龙江县、甘南县、泰来县
	吉林省	通榆县、长岭县
	辽宁省	彰武县、朝阳县、北票市、阜新蒙古族自治县、建昌县等
	河北省	赤城县、滦平县、怀安县、万全区等
	山西省	灵丘县、应县、右玉县、山阴县等
	陕西省	定边县、靖边县、安塞区、延川县等
	内蒙古自治区	达拉特旗、清水河县、多伦县、林西县等
	宁夏回族自治区	同心县、隆德县、盐池县、原州区等
	甘肃省	通渭县、安定区、环县、庆城县等
生态修复区(冷点区)	内蒙古自治区	太仆寺旗、化德县、商都县、察哈尔右翼后旗、察哈尔右翼中旗、察哈尔右翼前旗、集宁区、卓资县、兴和县、凉城县、赛罕区、和林格尔县
	河北省	尚义县
	山西省	五寨县、保德县、岢岚县、兴县、岚县、临县、方山县、娄烦县、古交市、离石区、柳林县、中阳县、石楼县、汾西县
	陕西省	吴堡县、绥德县、清涧县

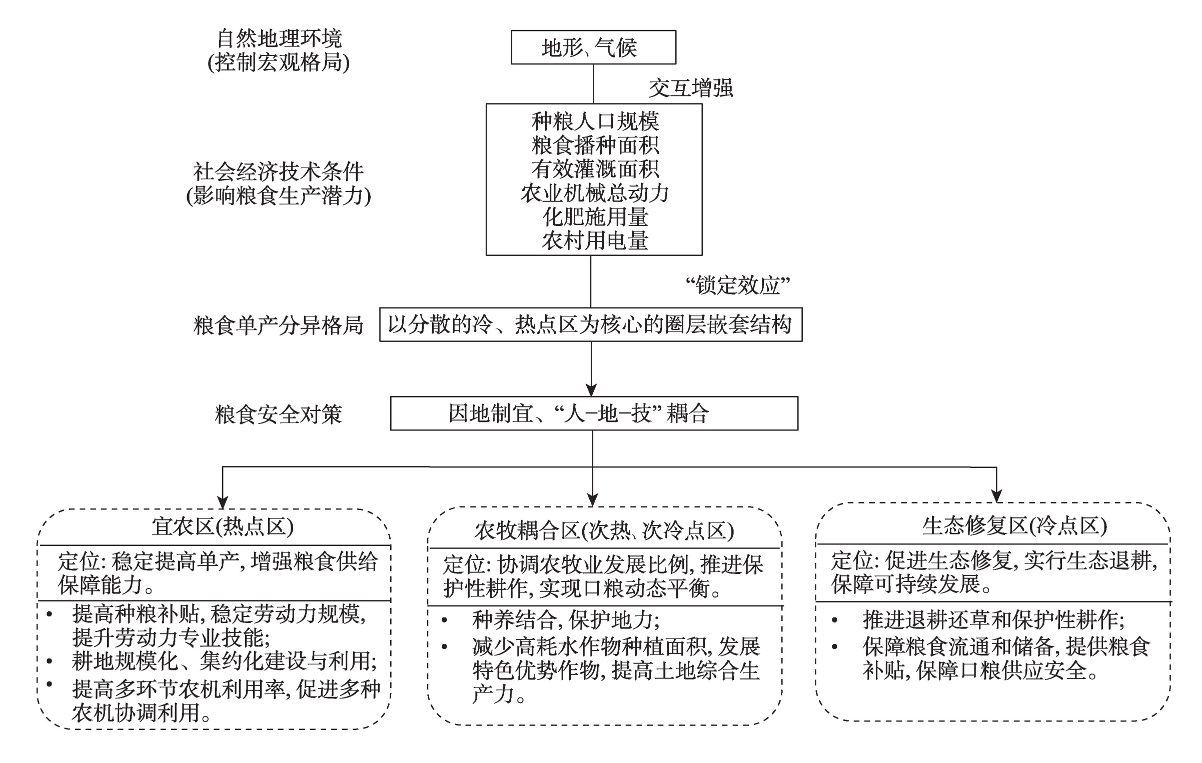


图5　中国北方农牧交错到粮食安全保障机制示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the mechanism for ensuring food security in the argo-pastoral ecotone of northern China

农田作业中的利用效率为抓手，发挥各种农业技术的协同效应，实现水、肥精准施控，促进粮食单产持续、健康增长。

5 结论

本文综合运用空间自相关分析和地理探测器方法，对2000—2020年北方农牧交错带的县域粮食单产时空分异特征及其影响因素进行分析，得出以下主要结论：

（1）在自然环境宏观分异大势的控制下，社会生产条件及其耦合水平强化了带内粮食单产的空间分异特征，使其呈现出空间依赖性和相对稳定性。其中，粮食单产热点区主要集中在自然条件优越的东北部平原地区和西南部河湟谷地，冷点区分布在中部的土地退化和丘陵地区，次热和次冷区围绕热、冷点区分布。依据该格局可将带内西南部和东北部划分为宜农区，北部和南部为农牧耦合区以及中部为生态修复区，以因地制宜地促进农牧业协调发展。

（2）带内粮食单产增长模式从以劳动力为主导转变为以现代农业技术为主导，但出现了劳动力与耕地、现代农业技术之间过度解耦，以及各种现代农业技术之间耦合性不足等问题。因此，应当通过健全粮食生产补贴、发展农业组织以及依靠农业机械促进多种农业技术协同利用等措施，实现"人-地-技"耦合发展，促进粮食单产持续、健康增长，提高带内粮食安全保障能力。

参考文献（References）

[1] 纪龙, 徐春春, 陈中督, 等. 中国粮食生产波动: 特征、成因及启示[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(3): 46-52. [Ji Long, Xu Chunchun, Chen Zhongdu, et al. The fluctuation of grain production in China: Characteristics, causes and implications[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(3): 46-52.]

[2] 李先德, 孙致陆, 赵玉菡. 全球粮食安全及其治理: 发展进程、现实挑战和转型策略[J]. 中国农村经济, 2022(6): 2-22. [Li Xiande, Sun Zhilu, Zhao Yuhan. Global food security and its governance: Development process, practical challenges and transformation strategies[J]. Chinese Rural Economy, 2022(6): 2-22.]

[3] 丁存振, 徐宣国. 国际粮食供应链安全风险与应对研究[J]. 经济学家, 2022(6): 109-118. [Ding Cunzhen, Xu Xuanguo. Research on security risks of international food supply chain and countermeasures[J]. Economist, 2022(6): 109-118.]

[4] 赵磊. 全球粮食安全与中国特色粮食安全治理[J]. 当代中国与世界, 2022(2): 59-67, 127-128. [Zhao Lei. Global food security and food security governance with Chinese characteristics[J]. Contemporary China and World, 2022(2): 59-67, 127-128.]

[5] 成升魁, 李云云, 刘晓洁, 等. 关于新时代我国粮食安全观的思考[J]. 自然资源学报, 2018, 33(6): 911-926. [Cheng Shengkui, Li Yunyun, Liu Xiaojie, et al. Thoughts on food security in China in the new period[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 911-926.]

[6] 高树琴, 段瑞, 王竑晟, 等. 北方农牧交错带在保障国家大粮食安全中发挥重要作用[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 643-651. [Gao Shuqin, Duan Rui, Wang Hongsheng, et al. Farming-pastoral ecotone of northern China plays important role in ensuring national food security[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(6): 643-651.]

[7] 张志新, 王迪, 唐海云. 中国粮食安全保障程度: 基于粮食消费结构变化的分析[J]. 消费经济, 2022, 38(5): 38-49. [Zhang Zhixin, Wang Di, Tang Haiyun. China's grain security guarantee: An analysis based on the change of grain consumption structure[J]. Consumer Economics, 2022, 38(5): 38-49.]

[8] 陶泽涪, 王世清, 孙丕苓, 等. 中国北方农牧交错带耕地时空分异及驱动因素[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 153-163. [Tao Zefu, Wang Shiqing, Sun Piling, et al. Spatio-temporal differentiation and driving factors of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 153-163.]

[9] 陈海, 康慕谊, 曹明明. 北方农牧交错带农林牧业生产结构类型空间分异特征研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 46-49. [Chen Hai, Kang Muyi, Cao Mingming. Spatial differentiation pattern of production structure in the farming-pastoral crisscross zone of north China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2): 46-49.]

[10] 胡兵辉, 廖允成, 王克勤, 等. 北方农牧交错带县域典型农业生态系统结构的对比演变[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 35-39, 43. [Hu Binghui, Liao Yuncheng, Wang Keqin, et al. The comparison and evolvement of agroecosystem structure in representative counties of the farming-pastoral ecotones in north China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 35-39, 43.]

[11] 周立华, 马永欢, 马绍休. 中国北方农牧交错带风水蚀复合区的粮食与退耕还林(草)问题[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 552-557. [Zhou Lihua, Ma Yonghuan, Ma Shaoxiu. Food supply and grain for green proiect in the water-wind erosion compound areas of farming and grazing interlaced zone in northern China[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 552-557.]

[12] 李玉红. 内蒙古粮食生产与生态安全屏障建设研究[J]. 生态经济, 2017, 33(3): 115-119. [Li Yuhong. On grain production and ecological security barrier construction in Inner Mongolia[J]. Ecological Economy, 2017, 33(3): 115-119.]

[13] 安萍莉, 潘志华, 郑大玮. 北方农牧交错带土地利用结构重建研究——以武川县为例[J]. 资源科学, 2002, 24(1): 35-39. [An

Pingli, Pan Zhihua, Zheng Dawei. Reconstruction land use structure in northern ecotone: The case of Wuchuan County[J]. Resources Science, 2002, 24(1): 35–39.]

[14] 杨骞, 司祥慧, 王珏. 减排增汇目标下中国粮食生产效率的测度及分布动态演进[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 600–615. [Yang Qian, Si Xianghui, Wang Jue. The measurement and its distribution dynamic evolution of grain production efficiency in China under the goal of reducing pollution emissions and increasing carbon sink[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 600–615.]

[15] 柏林川, 武兰芳, 宋小青. 1995—2010年山东省粮食单产变化空间分异及均衡增产潜力[J]. 地理科学进展, 2013, 32(8): 1257–1265. [Bai Linchuan, Wu Lanfang, Song Xiaoqing. Spatial difference of grain yield changes during 1995—2010 and balanced potential output to increase in Shandong Province[J]. Progress in Geography, 2013, 32(8): 1257–1265.]

[16] 刘同山. 新时代保障国家粮食安全的内涵、挑战与建议[J]. 中州学刊, 2022(2): 20–27. [Liu Tongshan. Connotations, challenges, and policy recommendations for ensuring national grain security in the new era[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2022(2): 20–27.]

[17] 张利国, 鲍丙飞, 董亮. 鄱阳湖生态经济区粮食单产时空格局演变及驱动因素探究[J]. 经济地理, 2018, 38(2): 154–161. [Zhang Liguo, Bao Bingfei, Dong Liang. Spatial and temporal pattern evolution of grain yield and spatial heterogeneity of driving factors in Poyang Lake eco-economic zone[J]. Economic Geography, 2018, 38(2): 154–161.]

[18] 邱孟龙, 曹小曙, 周建, 等. 基于GWR模型的渭北黄土旱塬粮食单产空间分异及其影响因子分析——以陕西彬县为例[J]. 中国农业科学, 2019, 52(2): 273–284. [Qiu Menglong, Cao Xiaoshu, Zhou Jian, et al. Spatial differentiation and impact factors of grain yield per hectare in Weibei Plateau based on GWR model: A case study of Binxian County, Shannxi[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(2): 273–284.]

[19] 程叶青. 东北地区粮食单产空间格局变化及其动因分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1541–1549. [Cheng Yeqing. Spatial pattern change and its driving factors of grain per unit area yield in northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1541–1549.]

[20] 刘玉, 唐秀美, 潘瑜春, 等. 黄淮海地区县域粮食单产的空间溢出效应及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 299–307. [Liu Yu, Tang Xiumei, Pan Yuchun, et al. Analysis on spatial spillover effect and influence factors of grain yield per hectare at county level in Huang-Huai-Hai region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 299–307.]

[21] 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 江苏省粮食生产时空格局及其驱动因素[J]. 经济地理, 2018, 38(12): 166–175. [Xia Siyou, Zhao Yuan, Xu Xin, et al. Spatiotemporal pattern and driving factors of grain production in Jiangsu Province[J]. Economic Geography, 2018, 38(12): 166–175.]

[22] 殷培红, 方修琦, 张学珍, 等. 中国粮食单产对气候变化的敏感性评价[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 515–524. [Yin Peihong, Fang Xiuqi, Zhang Xuezhen, et al. Identification of the susceptible regions to climate change impact on grain yield per unit area in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 515–524.]

[23] 李梦华, 韩颖娟, 赵慧, 等. 基于地理探测器的宁夏植被覆盖度时空变化特征及其驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1317–1325. [Li Menghua, Han Yingjuan, Zhao Hui, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics and driving factors of fractional vegetation cover in Ningxia based on geographical detector[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1317–1325.]

[24] 李云涛, 陶犁. 基于地理探测器的云南省边境州市旅游发展水平空间分异及影响因素分析[J]. 世界地理研究, 2022, 31(3): 624–636. [Li Yuntao, Tao Li. An analysis of spatial differentiation of tourism development level in border cities of Yunnan Province and influencing factors based on geo-detector[J]. World Regional Studies, 2022, 31(3): 624–636.]

[25] 史文娇, 刘奕婷, 石晓丽. 气候变化对北方农牧交错带界线变迁影响的定量探测方法研究[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 407–419. [Shi Wenjiao, Liu Yiting, Shi Xiaoli. Quantitative methods for detecting the impacts of climate change on the fluctuation of farming-pastoral ecotone boundaries in northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(3): 407–419.]

[26] 任强, 何春阳, 黄庆旭, 等. 中国北方农牧交错带贫困动态——基于贫困距离指数的分析[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 404–416. [Ren Qiang, He Chunyang, Huang Qingxu, et al. The poverty dynamics in the agro-pastoral transitional zone in northern China: A multi-scale perspective based on the poverty gap index[J]. Resources Science, 2018, 40(2): 404–416.]

[27] 邓晓倩, 马素娟, 曹晓萍, 等. 青海省互助县10年耕地土壤养分状况、变化趋势及肥力评价[J].水土保持研究, 2022, 29(6): 112–120. [Deng Xiaoqian, Ma Sujuan, Cao Xiaoping, et al. Evaluation of the cultivated land fertility and trend of soil nutrient status of Huzhu County in Qinghai Province in the past 10 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 112–120.]

[28] 李颉, 郑步云, 王劲峰. 2008—2018年中国手足口病时空分异特征[J]. 地球信息科学学, 2021, 23(3): 419–430. [Li Jie, Zheng Buyun, Wang Jinfeng. Spatial-temporal heterogeneity of hand, foot and mouth disease in China from 2008 to 2018[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(3): 419–430.]

[29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116–134.]

[30] 王俊帝, 刘志强, 刘俪胤, 等. 基于地理探测器的中国典型样带建成区绿地率空间分异的影响机理研究[J]. 生态经济, 2020, 36(10): 104–111. [Wang Jundi, Liu Zhiqiang, Liu Liyin, et al. Study on the influencing mechanism of spatial differentiation of green rate of built district of typical transects in China based on

geodetector[J]. Ecological Economy, 2020, 36(10): 104−111.]

[31] 闫旭东, 吴晓光, 张宏飞, 等. 基于粮食安全和生态安全视角的区域粮食生产布局分区——以内蒙古自治区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 156−162. [Yan Xudong, Wu Xiaoguang, Zhang Hongfei, et al. Regional food production layout based on food security and ecological: The Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(9): 156−162.]

[32] 温静, 张超, 张丽君, 等. 气候变化下中国粮食生产时空演变及影响因素[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 652−665. [Wen Jing, Zhang Chao, Zhang Lijun, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of Chinese grain production under climate change[J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition), 2020, 50(6): 652−665.]

[33] 汤瑛芳, 李红霞, 刘锦晖, 等. 甘肃省粮食生产形势及新时期粮食安全对策研究[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(8): 63−71. [Tang Yingfang, Li Hongxia, Liu Jinhui, et al. Situation of grain production in Gansu Province and countermeasures for grain security in new period[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2021, 52(8): 63−71.]

[34] 文琦, 刘彦随. 北方干旱化对水土资源与粮食安全的影响及适应——以陕北地区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 7−11. [Wen Qi, Liu Yansui. The response of water, land and food security towards the aridification and the adaptive measures: Case study of northern Shaanxi Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(7): 7−11.]

Food security in the argo-pastoral ecotone of northern China from the perspective of grain yield

KONG Deming[1,2], HAO Lisha[1,2], XIA Siyou[3,4], LI Hongbo[1,2]

(1. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The argo-pastoral ecotone of northern China is a key area for implementing the national food security strategy, and sustainable increase in grain yield is its main means. The spatial autocorrelation analysis is used to reveal the spatial variation and evolution characteristics of grain yield, which could be used as the basis for dividing farming regions and pastoral regions. A geodetector is then used to reveal the dominant factors and their interactions that control the spatial variation of grain yield, so as to explore the countermeasures to improve grain yield and food security. The main findings are as follows: (1) Grain yield in the argo-pastoral ecotone of northern China showed a relatively stable agglomerative distribution from 2000 to 2020, with the differentiation of natural environments as its basic controlling factor and social production conditions and their coupling levels strengthening the spatial variation characteristics of grain yield. (2) The hot spots of grain yield were concentrated in the plains of northeast and valleys of the southwest, cold spot areas were located in the central erosion and hilly areas, and the sub-hot and sub-cold spot areas in the north and south formed ring-shaped structures around the hot and cold spots. Based on this relatively stable pattern, the hot spot areas could be taken as the agriculture-suitable areas, the sub-hot and sub-cold spot areas as the agriculture-pastoral coupling area, and the cold spot areas as the ecological restoration areas. Based on this division, farming and livestock production could be developed according to the local conditions. (3) The growth pattern of grain yield in 2000—2020 has shifted from labor-led to technology-led approach. However, dissonance arose between labor, arable land, and technology as well as the application efficiency between various modern agricultural technologies. Therefore, “labor-land-technology” coupling development is proposed to sustainably improve grain yield and food security.

Key words: food security; spatial variation of grain yield; influencing factors; geodetector; argo-pastoral ecotone of northern China